

基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算法

蒋 鹏, 阮斌锋

(杭州电子科技大学信息与控制研究所, 浙江杭州 310018)

摘 要: 在基于分簇架构的水下传感器网络(Underwater Sensor Networks, UWSNs)中,当簇首以单跳或多跳的通信方式将数据传输至 Sink 节点时,由于簇首转发大量数据而负载过重,会过早耗尽能量而死亡,这将导致提前出现对监测区域的覆盖盲区.以改善覆盖效果为目标的 LEACH-Coverage-U 算法由于选举簇首的分簇方法具有随机性,也无法很好解决该问题.本文提出了一种水下传感器网络单跳覆盖保持路由算法(Single-hop Coverage-Preserving Routing Algorithm, SCPR),首先定义了覆盖冗余度(Coverage Redundancy, CR),然后根据该度量来选举簇首,最终以单跳方式直接将数据传送至 Sink 节点.为减少簇首能耗并获得更高的网络覆盖率,本文还提出一种多跳覆盖保持路由算法(Multi-hop Coverage-Preserving Routing Algorithm, MCPR),簇首之间通信时优先考虑父节点中 CR 较高的簇首作为其下一跳路由,以多跳路由将数据传送至 Sink 节点.仿真结果表明,与 LEACH-Coverage-U 算法相比,SCPR/MCPR 算法避免了其选举簇首时的随机性,提高了网络覆盖率,降低了网络能耗,延长了网络生命周期.

关键词: 水下传感器网络; 覆盖冗余度; 覆盖保持路由

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-2067-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.030

Cluster-Based Coverage-Preserving Routing Algorithm for Underwater Sensor Networks

JIANG Peng, RUAN Bin-feng

(Institute of Information & Control, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: In Underwater Sensor Networks (UWSNs) based on clustered architecture, cluster heads forward large number of data packets when they send data to the Sink using a single-hop or multi-hop mechanism. This mechanism can overload cluster heads, which soon become depleted of energy, causing coverage holes quickly. The LEACH-Coverage-U algorithm attempts to solve this problem, but because the cluster heads are randomly elected, this algorithm cannot solve this problem very well. In this paper, we propose a single-hop coverage-preserving routing algorithm (SCPR) for UWSNs. This algorithm first defines a metric of coverage redundancy (CR), and elects the cluster heads according to this metric. A cluster head sends the aggregated data directly to the Sink. To reduce energy consumption and achieve higher network coverage ratio, we also propose a multi-hop coverage-preserving routing algorithm (MCPR), where each cluster head prefers to select the node that has higher CR in the parent nodes as its next hop node. Finally, the aggregated data are sent to the Sink using multi-hop routing. Simulation results show that, compared to the LEACH-Coverage-U algorithm, both the SCPR and MCPR algorithms solve the problem that the cluster heads are randomly elected, improve the network coverage ratio, reduce network energy consumption and extend network lifetime.

Key words: underwater sensor networks; coverage redundancy; coverage preserving routing

1 引言

随着世界各国对海洋资源的日益重视和海洋经济浪潮的兴起,水下传感器网络的研究已经成为传感器网络系统中的一个研究热点.为使水下传感器网络能够更好地完成目标监测和信息获取的任务,必须保证传感器节点有效地覆盖监测区域.因此,采用具体的节点部署策略和覆盖控制方法是水下传感器网络一个基本且首要亟待解决的问题,直接关系到传感器网络的节点能量、通信带宽、计算处理能力等受限资源的优化配置,一定

程度上影响水下传感器网络的感知、监视、通信等各种服务质量.

目前水下传感器网络大都以“能量”为度量选举簇首或根据水下特性设计分簇算法^[1~4],未将“覆盖”作为考虑因素,忽略了簇首因能量耗尽对监测区域覆盖效果的影响.网络运行期间较难保证网络覆盖率,这对于“监测应用”为目的的水下传感器网络而言是致命、不可容忍的.基于此,一些学者开始研究传感器网络覆盖保持路由算法,网络运行过程中,网络覆盖率会不断降低,采用覆盖保持算法能减缓网络覆盖率下降的速度.目前的

研究集中于陆地传感器网络的覆盖保持路由算法,尚无适用于水下传感器网络的覆盖保持路由算法。

2 相关工作

Tao Shu 等人首次提出了“覆盖时间”的概念,旨在延长网络能达到对监测区域覆盖期望的时间^[5]。为达到该目的,目前大多采取节点调度方法(off-duty 机制)^[6~11],主要思想为寻找一组网络中的节点,将这些节点设为休眠节点或活跃节点,同时保持网络的连通性和覆盖率。上述算法通过寻找需要休眠或活跃的节点达到节省能量、消除冗余节点的目的,但没有解决有些关键节点(簇首)因能耗过多而导致网络能耗不均衡的问题,选举簇首时也未将节点对监测区域的覆盖贡献作为考虑因素,剩余能量少的节点通常不会被选为簇首,即使该节点对监测区域的覆盖贡献不大,该类节点若被选为簇首,其死亡不会对网络覆盖率产生较大影响;而剩余能量较多的节点则易被选为簇首,即使其对监测区域有较大的覆盖贡献,若死亡易出现对监测区域的覆盖盲区。

针对上述问题,Yun-Ren Tsai 等人在 LEACH 算法的基础上提出了一种覆盖保持路由算法 LEACH-Coverage-U,该算法为每个节点计算标准化有效覆盖度(节点的有效感知范围/对监测区域的覆盖贡献与最大感知范围的比值),以此为依据选举簇首,与 LEACH 算法相比,提高了网络覆盖率,延长了网络生命周期^[12]。在每一轮,每个节点生成一个在 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数 $Rand_m$,并计算自身在此轮中被选为簇首的阈值 $T(m)$,若 $T(m) \geq Rand_m$,则该节点被选为簇首。计算阈值 $T(m)$ 公式如下

$$T(m) = \begin{cases} \frac{p(m)}{1 - p(m) \times [\lambda \text{mod}(\frac{1}{p(m)})]}, & \text{if } m \in G' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $p(m)$ 是一个与标准化有效覆盖度成反比的参数,该值越大表示该节点的有效感知范围越小(对监测区域的覆盖贡献越小),该节点死亡不会对监测区域的网络覆盖率造成太大的影响,因此 $p(m)$ 越大表示节点 m 被选为簇首的概率越大; λ 表示算法运行的轮数;当节点 m 在某一轮中被选为簇首后,在 $1/p(m)$ 轮内将不再参与簇首的选取, G' 表示运行轮数在 $1/p(m)$ 轮数内的节点集合。簇首收集簇内数据后直接单跳将数据传送到 Sink 节点。该算法将节点对监测区域的覆盖贡献大小作为选拔簇首的依据,但在选举簇首时仍具有一定的随机性,对监测区域覆盖贡献大的节点也会被选为簇首,一定程度上影响了网络覆盖率。

本文提出了一种水下传感器网络单跳覆盖保持路

由算法(Single-hop Coverage-Preserving Routing Algorithm, SCPR)。为降低簇首能耗并获得更高的网络覆盖率,本文还提出一种多跳覆盖保持路由算法(Multi-hop Coverage-Preserving Routing Algorithm, MCPR),上述两种算法均以无需节点位置信息的覆盖冗余度为度量选举簇首,避免了 LEACH-Coverage-U 算法选举簇首时的随机性,选举的簇首均是对网络覆盖贡献不大的节点。此外,SCPR 和 MCPR 算法均采用适用于水下环境的 TDMA 协议以减小水声信道的传输时延。

3 水下传感器网络模型和能耗模型

3.1 水下传感器网络模型

假设所有节点随机均匀地部署在水下三维监测区域 M 内,节点一入水就抛锚固定自身位置,以避免节点随水流漂移导致偏离监测区域,且采用如下网络模型:

- (1) Sink 节点位于监测区域表面的中心;
- (2) 节点采用布尔感知模型,即若任意节点 i 的感知半径为 R_s ,则节点 i 的感知区域是以该节点所在位置为圆心、 R_s 为半径的球形 B_i ;
- (3) 所有节点都是同构的,具备数据融合的功能且每个节点都有唯一的标识(ID);
- (4) 根据接收节点的距离远近,发射节点可调整其发射功率以节约能耗;
- (5) 节点与其邻居节点的距离信息可通过接收信号强度 RSSI 或到达时间 TOA 等方法获得。

3.2 能耗模型

采用文献[2,4]中给出的以声波为媒介的水下网络数据通信能耗模型。 P_r 表示数据包能被接收的最低功率, d 表示数据包需要传输的距离,则节点发射数据所需的能量 $E_{tx}(d)$ 为

$$E_{tx}(d) = P_r \cdot T_p \cdot A(d) \quad (2)$$

其中, T_p 表示数据发射的时间(data packets duration); $A(d)$ 表示数据包在水下传输距离为 d 时能量衰减,用下式表示

$$A(d) = d^\lambda a^d \quad (3)$$

其中, λ 为能量扩散因子(圆柱形扩散为 1,实际情况为 1.5,球形扩散为 2);参数 $a = 10^{a(f)/10}$,由吸收系数 $a(f)$ ^[13] 决定

$$a(f) = 0.11 \frac{10^{-3} f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{10^{-3} f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-7} f^2 + 3 \times 10^{-6} \quad (4)$$

f 为载波频率,单位为 kHz,吸收系数的单位为 dB/m。

4 算法描述与流程

为衡量节点对监测区域覆盖贡献的大小,从而为选举簇首提供依据,本文提出了覆盖冗余度的概念,该度量表示监测区域节点的邻居节点集对本节点的感知

区域的覆盖程度,覆盖程度越大表示节点的覆盖冗余度越大,则节点对监测区域的覆盖贡献就越小,相关定义描述如下。

4.1 相关定义

(1) 邻居节点集: 设节点的感知半径为 R_s , 则任意节点 i 的邻居节点集为与该节点的距离小于等于 $2R_s$ 的所有节点集合, 用 $N(i)$ 表示

$$N(i) = \{j \in V \mid d(i, j) \leq 2R_s\} \quad (5)$$

其中, V 是监测区域 M 中所有节点的集合, $d(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 的欧氏距离。

(2) 覆盖冗余度 (CR): 指节点的邻居节点集对本节点的感知区域的覆盖程度。即对于任意节点 i , 它的邻居节点集的感知区域与该节点感知区域重叠部分的体积占其感知区域体积的比值, 用 $\gamma(i)$ 表示

$$\gamma(i) = \frac{\text{volume}(\left(\bigcup_{j \in N(i)} a_j\right) \cap (a_i))}{\text{volume}(a_i)} \quad (6)$$

其中, a_i 表示节点 i 的感知区域。

(3) 覆盖贡献: 若节点 i 自身的感知区域为 a_i , 该节点的邻居节点集的感知区域与该节点感知区域重叠部分为 $(\bigcup_{j \in N(i)} a_j) \cap a_i$, 则节点 i 的覆盖贡献 $NCC(i)$ 为

$$NCC(i) = \text{volume}(a_i) - \text{volume}(\left(\bigcup_{j \in N(i)} a_j\right) \cap a_i) \quad (7)$$

可以看出, CR 越小的节点对监测区域的覆盖贡献越大, CR 越大的节点对监测区域的覆盖贡献越小。

(4) 网络覆盖率: 指处于活跃状态的节点的感知区域与监测区域的比值。采用网格计算三维空间的覆盖率, 用 σ 表示

$$\sigma = \frac{n_c}{n_n} \quad (8)$$

其中, n_c 表示至少被一个传感器节点覆盖的小立方格, n_n 表示监测区域中小立方格的总数。

(5) 网络生命周期: 网络生命周期是衡量算法能量有效性的依据, 其定义为满足网络覆盖率 σ ($\sigma_{\text{expect}} \leq \sigma \leq 1$) 所运行的轮数。其中, σ_{expect} 表示用户所期望的网络覆盖率。

4.2 问题描述

基于分簇的传感器网络中, 当簇首以单跳或多跳的通信方式将数据传输至 Sink 节点时, 由于簇首转发大量数据而负载过重, 可能过早耗尽能量而死亡, 将导致提前出现对监测区域的覆盖盲区。为完成目标监测和信息获取的任务, 保证传感器节点有效地覆盖监测区域, 不同节点当选为簇首的概率并不相同。文献[12]为每个节点定义了标准化有效覆盖度(每个节点对其监测区域的有效贡献), 节点成为簇首的概率取决于该度量, 标准化有效覆盖度低的节点有更高的概率被选为簇首, 因为即使该节点因能量消耗过快而死亡, 对整个监测区域的覆盖效果并没有太大影响。假设节点 m

的感知范围单独被本节点覆盖的百分比为 η_0 , 被本节点及其邻居节点共同覆盖的百分比为 η_i , 则节点 m 的标准化有效覆盖度 $\eta(m)$ 表示为:

$$\eta(m) = \eta_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\eta_i}{i+1} \quad (9)$$

可以看出: (1) 计算标准化有效覆盖度需要节点的位置信息, 而水下环境节点定位较困难^[14]。现有的大多数覆盖控制算法^[8-10]根据节点的地理位置信息计算覆盖信息, 但是, 地理位置信息的获得依赖于外部基础设施(如 GPS、有向天线等), 极大地增加了节点的硬件成本和能耗; (2) 若节点存在很多邻居节点, 标准化有效覆盖度的计算复杂度较高。

针对上述问题, 本文首先定义了覆盖冗余度, 该指标表征了节点的感知区域被邻居节点覆盖的程度, 根据概率论的相关理论, 可由节点与邻居节点间的距离估算覆盖冗余度, 无需预知节点的位置信息, 避免了对水下节点定位, 下面介绍如何估算覆盖冗余度。

假设节点 i 能接收 n 个邻居节点发送的信标信息, 则节点 i 可根据信标信息的接收信号强度 RSSI 或到达时间 TOA 获得节点之间的距离。若节点 i 存在邻居节点 j , 且节点 i 与 j 间的距离为 d_{ij} , 用 O_1 、 O_2 表示节点 i 和节点 j 的位置, D_{xy} 表示 B_i 和 B_j 相交部分在 xyO_2 上的投影, 如图 1 所示 ($R_s < d_{ij} \leq 2R_s$), 则节点 i 的感知区域被节点 j 所覆盖的体积为

$$\begin{aligned} V_{ij} &= 2 \iint_{D_{xy}} \left(\sqrt{R_s^2 - x^2 - y^2} - \frac{d_{ij}}{2} \right) dx dy \\ &= 2 \iint_{D_{xy}} \left(\sqrt{R_s^2 - \rho^2} - \frac{d_{ij}}{2} \right) \rho d\rho d\theta \\ &= 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{R_s^2 - (\frac{d_{ij}}{2})^2}} \left(\sqrt{R_s^2 - \rho^2} - \frac{d_{ij}}{2} \right) \rho d\rho d\theta \\ &= 2 \left[\frac{2}{3} \pi \left(R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8} \right) - \frac{\pi d_{ij}}{2} \left(R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4} \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

显然, 能证明当 $0 < d_{ij} \leq R_s$ 时, 式(10)也成立。

节点 i 感知区域的体积为

$$V_i = \frac{4}{3} \pi R_s^3 \quad (11)$$

对于节点 i 感知区域内的任意感知点 s , 则该感知点被节点 j 所覆盖的概率为

$$P_j = \frac{V_{ij}}{V_i} = \frac{2 \left[\frac{2}{3} \pi \left(R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8} \right) - \frac{\pi d_{ij}}{2} \left(R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4} \right) \right]}{\frac{4}{3} \pi R_s^3} \quad (12)$$

由此可知, 节点 i 感知区域内任意一点被节点 j 覆盖的概率为 P_j , 节点 i 感知区域内未被节点 j 覆盖的概率为 \bar{P}_j , $\bar{P}_j = 1 - P_j$ 。

若节点 i 有 n 个邻居节点 ($t = 1, 2, 3 \dots n$), 则该节点感知区域内任意一点未被这 n 个邻居节点中的任意

一个覆盖的概率为 \bar{P} , 由于所有节点的位置相互独立,

因此有
$$\bar{P} = \prod_{i=1}^n \bar{P}_i \quad (13)$$

假设节点 i 感知区域内任意一点 s 至少被其中一个邻居节点覆盖的概率为 P , 则

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (14)$$

假设节点 i 的感知区域被其邻居节点覆盖的体积为 V_i , 则 V_i 体积的期望值为

$$E(V_i) = P \cdot V_i \quad (15)$$

根据式(6), 拥有 n 个邻居节点的节点 i 的 CR 期望值为

$$E(\gamma(i)) = \frac{E(V_i)}{V_i} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (16)$$

将式(12)代入式(16), 可得

$$E(\gamma(i)) = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{2 \left[\frac{2}{3} \pi (R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8}) - \frac{\pi d_{ij}}{2} (R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4}) \right]}{\frac{4}{3} \pi R_s^3} \right) \quad (17)$$

节点 i 的 CR 为 $\gamma(i) \approx E(\gamma(i))$, 与其邻居节点位置无关, 只需获取该节点与邻居节点的距离便可确定该节点的覆盖冗余度, 解决了水下节点定位困难的问题。

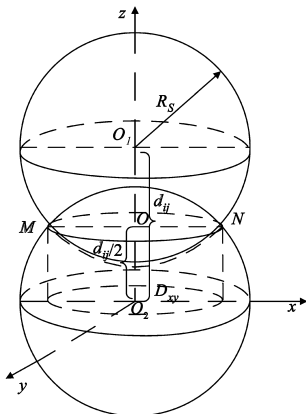


图1 节点感知区域相交示意图

4.3 算法流程

4.3.1 SCPR 算法

SCPR 算法是一种分布式竞争算法, 每个传感器节点都参与竞争, 它以“轮”为执行单位, 每一轮分为初始化阶段和稳定工作阶段。初始化阶段, 每个节点根据本节点的 CR 为自身设定等待时间, 等待时间较小的节点将率先声明为簇首并广播声明消息; 稳定工作阶段, 簇内成员节点在 TDMA 分配时隙内以单跳方式将数据帧发送至簇首(数据帧由几个小的数据包组成, 数据包也按分配时隙发送), 簇首对数据融合处理后将数据直接发送至 Sink 节点。经过一轮数据采集后, 重复上述两个阶段的工作, 如图 2 所示。

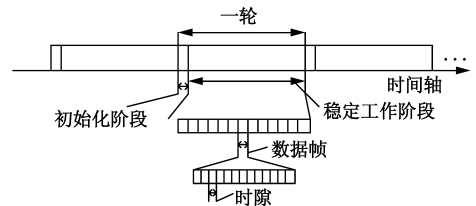


图2 SCPR算法示意图

(1)初始化阶段: 第一轮循环开始前, 每个节点利用非坚持型 CSMA(nonpersistent CSMA)协议以默认的发射功率(通信半径 $R_{default}$ 为 30m)发送信标信息给其邻居节点, 邻居节点通过 RSSI 或 TOA 估计节点之间的距离。每个节点保存一份邻居表 Neighbor_Table, 以存储其邻居节点的 ID、距离等相关信息。邻居节点的发现过程只需执行一次(第一轮循环开始前), 因为邻居节点的 ID、节点间距离都是固定的。

每个节点根据其其与邻居节点的距离计算 CR , 并由此为自身设定等待时间:

$$T_i = (1 - \gamma(i)) + rand(0, \alpha) \quad (18)$$

式(18)的第一部分是与 CR 成反比的数值; 第二部分 $rand(0, x)$, 表示生成一个 $[0, \alpha]$ 之间的随机数, 以避免具有相同 CR 的节点发生冲突, 取 $\alpha = 0.1$ 。由式(18)可以看出, CR 大的节点将率先声明成为簇首并利用非坚持型 CSMA 协议发送 CH_ADV 消息, 该消息包含簇首的 ID。若节点 i 在其等待时间结束之前已经收到 CH_ADV 消息, 则该节点退出簇首竞争成为普通节点并将接收的 CH_ADV 消息保存至该节点的集合 $Sch(i)$ 。节点在等待超时之前可能收到多个 CH_ADV 消息。节点根据 $Sch(i)$ 和 Neighbor_Table 中的信息加入距离自身最近的簇首以减少通信能耗, 并向簇首发送加入的应答消息 Join_REQ。对于边缘节点而言, 所有簇首都不在其通信范围内, 因此边缘节点直接发送数据至 Sink 节点, 保证了网络的连通性。

(2)稳定工作阶段: 初始化阶段结束后, 簇首为簇内成员分配各自的 TDMA 时隙, 并再次广播将时序分配表发送给簇内所有节点。簇内成员在 TDMA 分配时隙内以单跳方式将采集到的数据发送至簇首, 簇首对数据进行融合处理后将数据直接发送至 Sink 节点。为实现水声信道的时隙分配, 本文采用文献[1]提出的 TDMA 协议为簇内成员分配 TDMA 分配时隙能有效解决数据包传输时的冲突和延迟, 适用于水下传感器网络。

采用 TDMA 协议能避免簇内通信的数据碰撞, 但簇间的干扰并没有消除, 为此网络中的每个簇采用直接序列扩频(DSSS)减小干扰。基于发送器的码片分配方法(transmitter-based code assignment)为每个簇分配一个唯一的扩频码, 簇内节点使用相同的扩频码将数据传

输至簇首^[1],本文为每个簇分配一个扩频码(包括 Sink 节点),簇内节点通过 TDMA 和 DSSS 将数据传输至簇首,消除了簇间干扰,每个簇首对数据融合处理后,使用之前分配的扩频码将融合结果发送至 Sink 节点.

一轮数据传输工作完成后,整个网络进入下一轮工作周期,返回初始化阶段.与 LEACH 等传统的分簇算法不同,SCPR 算法在经过一轮的工作后,网络中可能没有节点死亡,因此网络的拓扑结构及每个节点的 CR 都不会发生改变,SCPR 算法继续选择上一轮选举出的簇首.对节点 i ,若 $E(i) \leq E_{th}$,则判定该节点为死亡节点;若 $E(i) > E_{th}$,则该节点为存活节点.每轮结束后,当节点达到能量阈值 E_{th} 时则发送消息给其邻居节点 i ,更新节点 i 的邻居表 Neighbor_Table.新一轮开始时,根据节点邻居表 Neighbor_Table 判断是否有节点死亡.若未出现死亡节点,将继续以上一轮选举的簇首进行数据传输.

4.3.2 MCPR 算法

为保证簇首能量均衡以获得更高的网络覆盖率,本文还提出一种多跳覆盖保持路由算法 MCPR,该算法与 SCPR 算法不同之处在于:按等待时间选出簇首后,簇内成员节点在 TDMA 分配时隙内以单跳方式将采集的数据发送至簇首,经簇首融合处理后多跳路由至 Sink 节点,而不是单跳直接将数据发送至 Sink 节点.具体实现过程在此不赘述.

5 仿真算例与性能分析

5.1 仿真场景及参数设置

为了分析 SCPR、MCPR 算法的有效性,对 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数、网络剩余平均能量、簇首个数、网络覆盖率等指标进行仿真、分析和比较.仿真时,将 500 个传感器节点随机部署在 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$ 的水下三维监测区域 M 中, Sink 节点的坐标为 $(50, 50, 100)$ (单位为 m),即水平面中心.为计算网络覆盖率,将区域 M 划分为 $100 \times 100 \times 100$ 个小立方格,每个立方格的大小为 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$.仿真结果是 100 次实验的平均值,其它参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数	取值
节点初始能量 (E_{init})	10 J
节点感知半径 (R_s)	15 m
数据接收功率门限 (P_r)	3 mW
数据传输速率 (R_b)	10 Kbps
数据融合能耗 (E_{df})	5 nJ/bit
数据包长度 (L)	1000 bit
能量扩散因子 (λ)	1.5
载波频率 (f)	25 kHz
节点能量阈值 (E_{th})	10^{-3} J

5.2 仿真算例

图 3 是 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数对比图,由图中可以看出,网络运行 50 轮之前,LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数多于 MCPR 算法,80 轮之前 LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数多于 SCPR 算法,因为 LEACH-Coverage-U 算法选举簇首具有一定的随机性,整个网络的能耗可较均匀地分配至各个节点,MCPR 算法和 SCPR 算法以 CR 为度量选举簇首,簇首可能 CR 较大而剩余能量不多.网络运行 50 轮后,相对于 MCPR 算法,LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数急剧下降,这是由于 LEACH-Coverage-U 算法的簇首与 Sink 节点间采用单跳通信,MCPR 算法的簇首与 Sink 节点采用多跳通信,降低了簇首能耗,提高了网络的存活节点数.网络运行 80 轮后,LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数与 SCPR 算法基本相同.由图 3 还可以看出,在网络运行过程中,MCPR 算法的存活节点数始终多于 SCPR 算法.此外,虽然在网络运行前期 LEACH-Coverage-U 算法的存活节点数相对较多,但并不意味着 LEACH-Coverage-U 算法能获得更高的网络覆盖率,因为网络覆盖率还依赖于存活节点对监测区域的覆盖贡献.

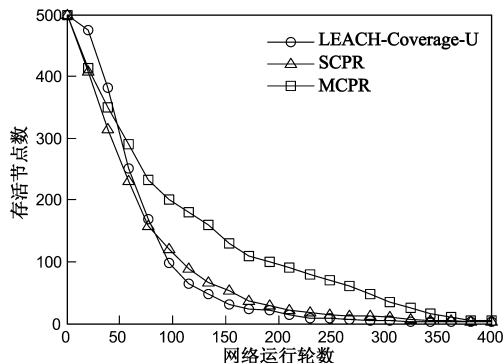


图 3 网络存活节点数对比图

图 4 是 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的网络剩余平均能量对比图.网络剩余平均能量是指网络剩余总能量与网络节点数的比值.可以看出,MCPR 算法比 SCPR 算法的能耗更低,因为 MCPR 算法的簇首间采用多跳通信,减少了能耗.此外,同为单跳通信的 SCPR 算法与 LEACH-Coverage-U 算法相比,SCPR 算法的能耗更低,这是因为 SCPR 算法的簇首间距离不小于 $R_{default}$,使簇首能均匀分布在监测区域中,而 LEACH-Coverage-U 算法的分簇机制可能会导致簇首集中分布于某些区域,产生较多边缘节点,所有簇首都不在其通信范围内,边缘节点与 Sink 节点间需远距离通信,增加了能耗.

图 5 是 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的簇首个数对比图.可以看出,相对于 LEACH-Coverage-U 算法,MCPR 和 SCPR 算法的簇首个数变化相对较平缓,

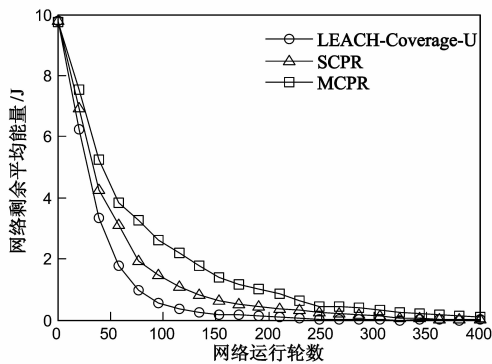


图4 网络剩余平均能量对比图

LEACH-Coverage-U 算法的簇首个数震荡比较剧烈,这是因为经过一轮工作,网络中可能没有节点死亡,因此网络的拓扑结构未改变,每个节点的覆盖冗余度也未变化,MCPR 和 SCPR 算法会继续选择前一轮选举的簇首和树形路由,因此簇首个数相对保持平缓。

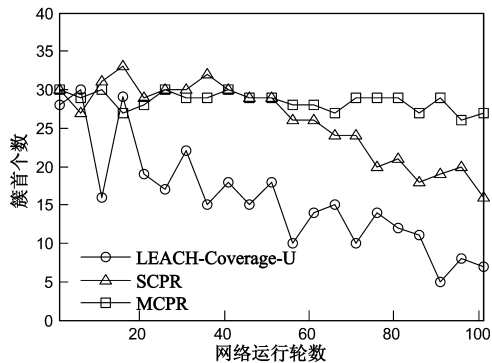


图5 簇首个数对比图

图 6 是 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的网络覆盖率随死亡节点个数变化的趋势图。当死亡节点个数相等时,MCPR、SCPR 及 LEACH-Coverage-U 算法取得的网络覆盖率依次下降,这是因为 MCPR 和 SCPR 算法采用的簇首选举机制使得每次选择的簇首都是覆盖冗余度相对较高的节点,相比于 LEACH-Coverage-U 算法,能更有效地提高网络覆盖率。此外,MCPR 算法簇首间采用多跳通信,且下一跳簇首也是由节点的 CR 确

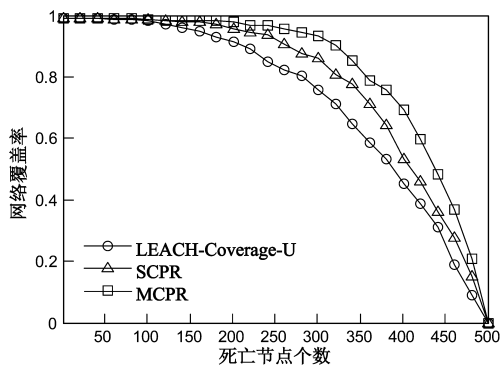


图6 网络覆盖率随死亡节点个数变化趋势图

定,因此相对于 SCPR 算法,MCPR 算法也取得了更高的网络覆盖率。

图 7 是 SCPR、MCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法的网络覆盖率随网络运行轮数变化的趋势图。可以看出,就网络覆盖率而言,相对于 SCPR 与 LEACH-Coverage-U 算法,MCPR 算法有较大优势,SCPR 算法的网络覆盖率也比 LEACH-Coverage-U 算法要高。由图 3 看出,网络运行 50 轮前 LEACH-Coverage-U 算法比 MCPR 算法拥有更多的存活节点,第 50 轮时 LEACH-Coverage-U 算法与 MCPR 算法拥有相同的存活节点,由图 7 可以看出,此时 MCPR 算法的网络覆盖率比 LEACH-Coverage-U 算法高 10% 左右。同样,第 50 轮时 SCPR 算法的网络覆盖率比 LEACH-Coverage-U 算法高 5% 左右,即使此时 LEACH-Coverage-U 算法拥有更多的存活节点。第 80 轮时,在拥有相同存活节点数的情况下,SCPR 算法的网络覆盖率比 LEACH-Coverage-U 算法将近高 20% 左右。同样,第 80 轮时 MCPR 算法比 LEACH-Coverage-U 算法拥有更多的存活节点数,并取得比 LEACH-Coverage-U 算法高 35% 左右的网络覆盖率。假设对监测区域的期望覆盖率 σ_{expect} 为 60%,那么 LEACH-Coverage-U、SCPR 与 MCPR 算法满足要求的网络运行轮数分别约为 85 轮、110 轮、185 轮。相对于 LEACH-Coverage-U 算法,SCPR 算法和 MCPR 算法的网络生命周期分别延长了将近 25 轮和 100 轮。

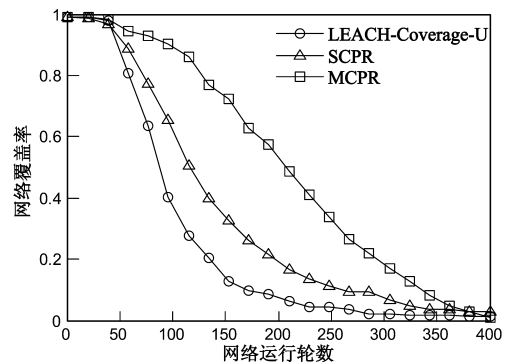


图7 网络覆盖率随网络运行轮数变化趋势图

6 结语

水下传感器网络中,覆盖保持是保证服务质量(QoS)的关键,直接影响网络的监测质量及生命周期。本文提出了一种水下传感器网络单跳覆盖保持路由算法(SCPR 算法),首先定义了覆盖冗余度,通过该度量选举簇首,并以此为每个节点设定等待时间,覆盖冗余度高的节点率先发送消息声明成为簇首,并通过 TDMA/DSSS 技术将数据单跳传送至 Sink 节点。为减少簇首能耗并获得更高的网络覆盖率,本文还提出一种多跳覆盖保持路由算法(MCPR 算法),簇首间通信时父节点中

覆盖冗余度最高的簇首作为其下一跳路由,对簇内成员采集的数据融合处理后通过 TDMA/DSSS 技术多跳路由至 Sink 节点.上述两种算法避免了 LEACH-Coverage-U 算法选举簇首时的随机性,仿真结果表明,相比于 LEACH-Coverage-U 算法,SCPR 和 MCPR 算法能降低网络能耗,提高网络覆盖率,延长网络生命周期.

参考文献

- [1] Domingo M C. A distributed energy-aware routing protocol for underwater wireless sensor networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2011, 57(4): 607 – 627.
- [2] Chenn-Jung Huang, Yu-Wu Wang, Chin-Fa Lin, et al. A self-healing clustering algorithm for underwater sensor networks [J]. *Cluster Computing*, 2011, 14(1): 91 – 99.
- [3] Ayaz Muhammad, Abdullah Azween, Jung Low Tang. Temporary cluster based routing for underwater wireless sensor networks [A]. *Proceedings of 2010 International Symposium in Information Technology [C]*. Kuala Lumpur: IEEE Computer Society, 2010. 1009 – 1014.
- [4] Yang Guangsong, Xiao Mingbo, Cheng En, et al. A cluster-head selection scheme for underwater acoustic sensor networks [A]. *Proceedings of 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing [C]*. Shenzhen: IEEE Computer Society, 2010. 188 – 191.
- [5] Shu Tao, Krunz Marwan, Vrudhula Sarma. Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks [A]. *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing [C]*. New York Urbana-Champaign, IL, United States: Association for Computing Machinery, 2005. 111 – 120.
- [6] Boukerche A, Fei Xin, Araujo R B. An energy-efficient sensing coverage protocol for surveillance and monitoring applications using wireless sensors [A]. *Proceedings of 25th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference [C]*. Phoenix, AZ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006. 611 – 616.
- [7] Hwang S F, Su Y Y, Lin Y Y, et al. A cluster-based coverage-preserved node scheduling scheme in wireless sensor networks [A]. *Proceedings of 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems-Workshops [C]*. San Jose, CA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2006. 1 – 7.
- [8] Noh Youngtae, Lee Saewoom, et al. Base station-aided coverage-aware energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks [A]. *Proceedings of 2008 IEEE Wireless Communica-*

tions and Networking Conference [C]. Las Vegas, NV: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008. 2486 – 2491.

- [9] Shen Fengyang, Sun Min-te, Liu Chunlei, et al. Coverage-aware sleep scheduling for cluster-based sensor networks [A]. *Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]*. Budapest: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2009. 1 – 6.
- [10] Tung Kei-Chen, Lu Jonathan Chun-Hsien, et al. A distributed sleep scheduling algorithm with range adjustment for wireless sensor networks [J]. *Computational Collective Intelligence, Technologies and Applications*, 2010, 6423: 387 – 397.
- [11] 王换招, 孟凡治, 李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议 [J]. *软件学报*, 2010, 21(12): 3124 – 3137. Wang Huanzhao, Meng Fanzhi, Li Zengzhi. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(12): 3124 – 3137. (in Chinese)
- [12] Tsai Yun-Ren. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1240 – 1245.
- [13] Wang Pu, Li Cheng, Zheng Jun, Mouftaf Hussein T. A dependable clustering protocol for survivable underwater sensor networks [A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications [C]*. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008. 3263 – 3268.
- [14] Hu Tiansi, Fei Yunsi. QELAR: A machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2010, 9(6): 796 – 809.

作者简介



蒋 鹏 男, 1975 年生于浙江衢州. 杭州电子科技大学教授、硕士生导师, 研究方向为无线传感器网络、物联网技术、嵌入式系统及其应用. E-mail: pjjiang@hdu.edu.cn



阮斌锋 男, 1985 年生于浙江绍兴. 杭州电子科技大学硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络.